

УДК 532.542

О.В. Николаев, С.А. Бородин, С.А. Шулепин

Экспериментальное изучение подобия вертикальных газожидкостных потоков в условиях эксплуатации обводненных газовых скважин

Ключевые слова: вертикальные газожидкостные потоки, параметры подобия, обводняющиеся скважины, экспериментальные исследования.

Keywords: vertical gas-liquid flows, scaling parameters, well watered, and experimental investigations.

Основная доля российского газа в настоящее время добывается из месторождений, перешедших в завершающую стадию разработки, поэтому задача максимально полного извлечения остаточных запасов газа из этих месторождений, оцениваемых величинами в триллионы кубометров, становится особенно актуальной. Одним из существенных отрицательных факторов на этой стадии добычи является наличие жидкой фазы в продукции скважин, что приводит к увеличению потерь давления в лифтовых трубах и самозадавлению скважин.

Для предупреждения негативных последствий водопроявлений необходимо иметь адекватную математическую модель, позволяющую рассчитывать потери давления в лифтовых колоннах в реальных промышленных условиях. Например, для сеноманских скважин Западной Сибири на поздней стадии эксплуатации характерны следующие физические условия: давления до 3,0 МПа; дебиты газа до 200 тыс. м³/сут; водогазовый фактор в пределах 0,1–20 см³/м³; диаметры лифтовых труб от 7,6 см до 15,3 см.

В настоящее время существует ряд моделей, разработанных разными авторами для описания газожидкостных потоков в вертикальных трубах в различных диапазонах физических условий. Эти модели основаны на использовании безразмерных критериев, которые, по мнению авторов, являются определяющими в выбранном диапазоне условий.

Поскольку выбор определяющих критериев является ключевым вопросом при создании модели газожидкостных потоков, рассмотрим основные безразмерные параметры, которые используются в настоящее время в двухфазной трубной гидродинамике применительно к эксплуатации газовых скважин с водопроявлениями.

В гидродинамике известны и широко используются такие фундаментальные комплексные параметры, или критерии подобия, как числа Рейнольдса

$$\left(Re = \frac{\rho u L}{\mu} \right), \text{ Фруда } \left(Fr = \frac{u^2}{gL} \right), \text{ Эйлера } \left(Eu = \frac{\Delta p}{\rho u^2} \right), \text{ Вебера } \left(We = \frac{L \rho u^2}{\sigma} \right), \text{ Галилея } \left(Ga = \frac{Re^2}{Fr} \right), \text{ Архимеда } \left(Ar = \frac{\rho_1 - \rho_2}{\rho_1} \cdot \frac{gL^3}{\nu^2} \right); \text{ концентрационные симплексы – истинное объемное газосодержание } (\varphi), \text{ расходное объемное газосодержание } (\beta), \text{ относительная плотность фаз } (\bar{\rho}) \text{ и некоторые другие. Этот далеко не полный перечень применяющихся в гидродинамических расчетах фундаментальных критериев даже для однофазных систем весьма значителен. Кроме того, имеется большое количество модификаций этих критериев по характерному линейному размеру } L. \text{ Для двухфазных смесей количество модификаций существенно возрастает, поскольку в качестве физических параметров, входящих в состав того или иного критерия, могут применяться характеристики обоих флюидов или их сочетания. Стоит также отметить, что исследователи газожидкостных потоков в разное время ввели в рассмотрение еще ряд безразмерных параметров, которые, по их мнению, были наиболее существенными для условий эксплуатации газовых скважин, содержащих в продукции жидкость, и использовались как числа подобия [1] (табл. 1).$$

Таблица 1

Показатель скорости жидкости (H.Jr. Duns and N.C.J. Ros, 1963)	$N_{жс} = w_{жс} \sqrt[4]{\frac{\rho_{жс}}{g\sigma}}$
Показатель скорости газа	$N_z = u_z \sqrt[4]{\frac{\rho_{жс}}{g\sigma}}$
Показатель диаметра трубы	$N_d = d \sqrt[4]{\frac{\rho_{жс} g}{\sigma}}$
Показатели вязкости жидкости	$N_{\mu} = \mu_{жс} \sqrt[4]{\frac{g}{\rho_{жс} \sigma^3}}$ $N_{\mu,2} = \frac{\mu_{жс}}{\rho_{жс} \sigma d}$
Промежуточный безразмерный параметр	$a = \frac{uw^{0,38} \sigma^{0,725}}{d^{2,14} \rho^{0,725} g^{1,415}}$
Параметры, введенные Греем (Gray, 1978)	$N_v = \frac{\rho_{см}^2 v_{см}^4}{g\sigma(\rho_{жс} - \rho_z)}$ $N_D = \frac{g(\rho_{жс} - \rho_z)d^2}{\sigma}$ $R = \frac{w_{жс}}{u_z}$
Параметр, характеризующий переход между пузырьковым и пробковым режимами (Y.M. Taitel, D. Barnea, A.E. Dukler, 1980)	$N_1 = d \sqrt[4]{\frac{\rho_{жс}^2 g}{(\rho_{жс} - \rho_z)\sigma}}$
Параметр, характеризующий переход между вспененным и дисперсно-кольцевым режимами	$N_2 = u_z \sqrt[4]{\frac{\rho_z^2}{g\sigma(\rho_{жс} - \rho_z)}}$
Критерий устойчивости газожидкостного потока (С.С. Кутателадзе, 1958)	$Ku = \frac{u_z \sqrt{\rho_z}}{\sqrt[4]{g\sigma(\rho_{жс} - \rho_z)}}$

Необходимо иметь в виду, что, поскольку двухфазные потоки представляют собой сложные системы, механическое использование одних и тех же методов их расчета для разных физических условий (диаметры труб, величины расходов жидкости и газа, давления и т.д.) не дает удовлетворительных результатов. Поэтому области применения перечисленных критериев чаще всего ограничены диапазонами физических параметров тех экспериментов, по результатам которых разрабатывалась та или иная математическая модель газожидкостных потоков. В табл. 2 работы [2] представлен перечень известных экспериментальных исследований в области гидродинамики вертикальных газожидкостных потоков, условия проведения которых наиболее близки к диапазонам физических параметров, имеющим место в скважинах сеномана. Однако эти исследования не охватывают диапазона условий, характерного для поздней стадии разработки.

Для разработки адекватной гидродинамической модели, позволяющей рассчитывать газожидкостные потоки в газовых скважинах на завершающей стадии разработки месторождений, в ООО «Газпром ВНИИГАЗ» создан специализированный стенд [3]. Технологическая схема стенда изображена на рис. 1; воспроизводимые диапазоны параметров представлены в табл. 2.

В процессе эксперимента на стенде задаются: геометрические размеры (длина и диаметр) испытываемой колонны; давление в системе; расход газа и расход жидкости, подаваемых в нижнюю часть колонны. Определяется перепад давления на концах колонны. По результатам замеров при фиксированных давлении в системе и расходе жидкости для разных значений расхода газа строится кривая, которая называется индикаторной кривой

Таблица 2

Технические характеристики экспериментального стенда

Количество лифтовых колонн	4
Диаметры лифтовых колонн	6,2–15,3 см
Высота колонн	30 м
Рабочая среда	Воздух, вода
Дебит газа	10–180 тыс. м³/сут
Способ подачи газа	Циркуляция по замкнутому контуру с помощью высокоточных регулируемых воздушных нагнетателей
Давление	0,1–3,0 МПа
Дебит воды	От 0,05 до 10 м³/сут
Способ подачи воды	Система регулируемых плунжерных насосов

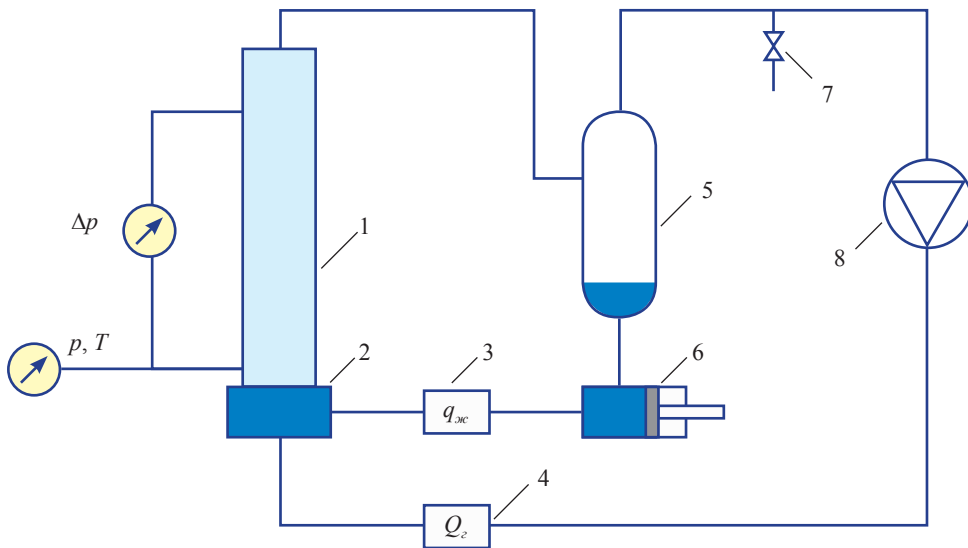


Рис. 1. Функциональная схема экспериментального стенда:

1 – испытуемая колонна; 2 – смеситель; 3 – расходомер жидкости; 4 – расходомер газа; 5 – сепаратор; 6 – жидкостной насос; 7 – линия впуска и выпуска газа; 8 – блок газовых нагревателей; p – давление; Δp – потери давления на трение; Q_c – расход газа при рабочем давлении; T – температура; $q_{жс}$ – расход жидкости

газожидкостного подъемника, или характеристикой лифта. На рис. 2 изображены типичные характеристики лифта; там же – кривые для однофазного газового потока.

Для создания математической модели, адекватно отражающей поведение газожидкостных смесей применительно к газовым скважинам на завершающей стадии разработки, необходимо определить ключевые безразмерные параме-

тры, существенные для рассматриваемых процессов. Анализ экспериментальных результатов показал, что для труб диаметром более 10 см и водогазовых факторов от $10 \text{ м}^3/\text{м}^3$ и ниже перечисленные параметры не являются определяющими. Для условий эксплуатации скважин сеномана существенными оказались три параметра, два из которых были предложены в 1974 г. [4], а третий – впервые в 2012 г. [5].

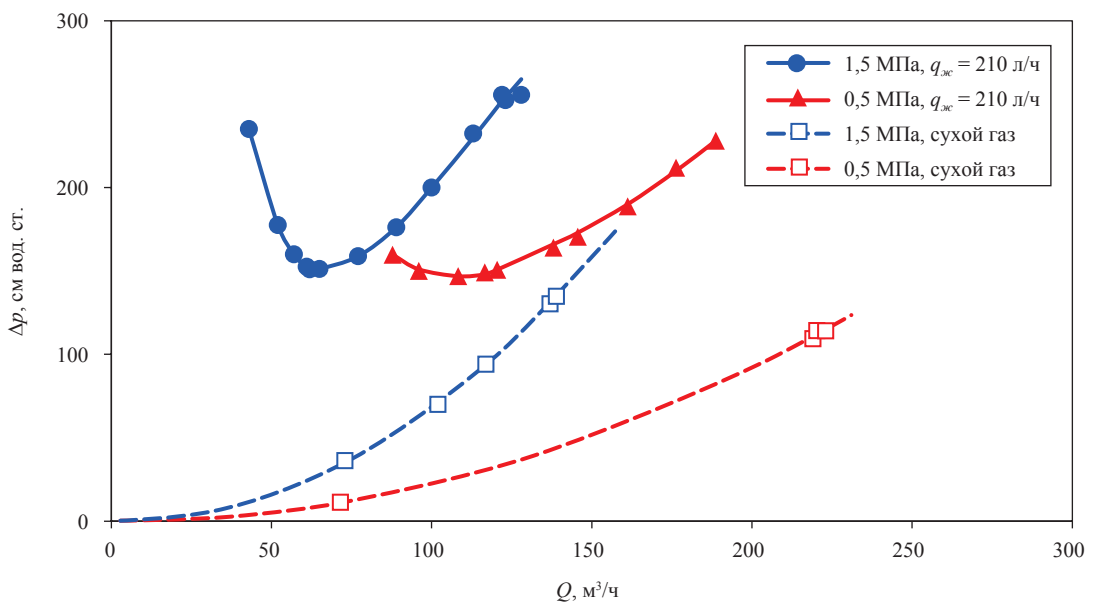


Рис. 2. Результаты экспериментов, проведенных на трубе диаметром 6,2 см при давлениях 0,5 и 1,5 МПа, для сухого газа и водовоздушной смеси с расходом жидкости $q_{жс} = 210 \text{ л/ч}$ в координатах « $\Delta p - \rho Q$ »

Одним из этих параметров [4] является модифицированный параметр Фруда, который имеет следующую структуру:

$$Fr^* = \frac{\rho_z \cdot u^2}{\rho_0 \cdot g d}, \quad (1)$$

где ρ_z – плотность газа при рабочих условиях; ρ_0 – величина с размерностью плотности, не зависящей от давления; u – расход газа в рабочих условиях, приведенный к единице площади поперечного сечения трубы (эту величину часто называют средней скоростью газа); g – ускорение свободного падения; d – диаметр трубы.

Второй предложенный в работе [4] параметр представляет собой безразмерные потери давления на трение:

$$i = \frac{\Delta p}{\rho_{ж} g L}, \quad (2)$$

где L – длина трубы.

Для проверки адекватности использования параметров i и Fr^* при описании поведения вертикальных газожидкостных смесей в 2005 г. на стенде ООО «Газпром ВНИИГАЗ» были поставлены специальные эксперименты. Первая серия экспериментов проводилась на трубе диаметром 6,2 см при давлениях 0,5; 1,0 и 1,5 МПа для двух вариантов: при чисто газовом потоке и при течении водовоздушной смеси с расходом жидкости $q_{ж} = 210$ л/ч. Результаты опытов при давлениях 0,5 и 1,5 МПа представлены на рис. 2 в координатах « $\Delta p - Q$ ».

На рис. 3 представлены результаты экспериментов этой серии в координатах « $\Delta p - \rho Q^2$ ».

Согласно графику, во-первых, зависимости, полученные при разных давлениях в системе, совпали, и, во-вторых, правые ветви кривых параллельны зависимости для сухого газа, которая в выбранных координатах описывается аналогом уравнения Дарси–Вейсбаха:

$$\Delta p = \frac{\lambda}{2} \cdot \frac{L}{d} \cdot \rho u^2 = \frac{2\lambda}{\pi^2} \cdot \frac{L}{d^5} \cdot \rho Q^2, \quad (3)$$

где λ – коэффициент гидравлического сопротивления трубы для однофазного газа; Q – объемный расход газа при рабочих условиях; ρ – плотность.

Эти эмпирические факты позволяют сделать вывод, что потери в двухфазном потоке определяются величиной напора газа ρu^2 . Таким образом, величину скорости газа неправомерно использовать как критерий выноса жидкости в скважине, поскольку этот критерий не учитывает влияния на изучаемый процесс величины давления.

Согласно формуле (1), величина напора газа стоит в числителе модифицированного параметра Фруда. Рассмотрим параметры, входящие в знаменатель (1).

Начнем с анализа влияния диаметра трубы. Как отмечено выше, стенд позволяет проводить эксперименты на трубах разного диаметра, что дало уникальную возможность определить зависимость потерь давления и других параметров потока от диаметра трубы.

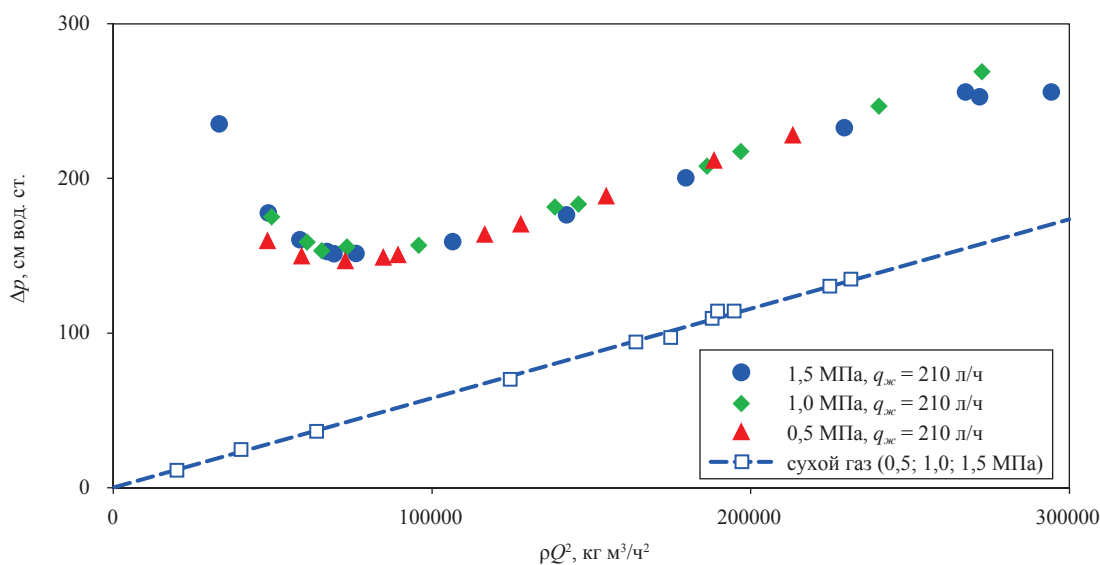


Рис. 3. Результаты экспериментов на трубе диаметром 6,2 см при давлениях 0,5; 1,0 и 1,5 МПа для сухого газа и водовоздушной смеси с расходом жидкости $q_{ж} = 210$ л/ч в координатах « $\Delta p - \rho Q^2$ »

Экспериментальные точки в опытах по исследованию однофазного газового потока в трубах разного диаметра, представленные в координатах « $i - Fr^*$ », сливаются в одну прямую линию с углом наклона $\lambda / 2$, что соответствует уравнению Дарси–Вейсбаха, а зависимости для газожидкостных потоков при разных значениях расхода жидкости и разных диаметрах трубы имеют минимумы при близких значениях модифицированного параметра Фруда. Таким образом, потери давления оказались обратно пропорциональными пятой степени диаметра трубы (3) (рис. 4).

Теперь рассмотрим величину с размерностью плотности, стоящей в знаменателе (1), поскольку пока вопрос о величине нормирования плотности газа в числителе остается открытым. Существует два очевидных варианта: в качестве ρ_0 фигурирует либо плотность жидкости, либо плотность газа при стандартных условиях. Для прояснения этого вопроса были поставлены специальные опыты с гелием, который существенно (в 7 раз) отличается от воздуха по плотности. Эксперименты проводились в трубе диаметром 6,2 см для газожидкостных смесей «вода – воздух» и «вода – гелий» при расходе воды 130 л/ч в координатах « $i - Fr^*$ ». Обработка экспериментов была проведена указанными двумя способами; результаты показали, что нормирующей величиной является плотность жидкости:

$$Fr^* = \frac{\rho_z}{\rho_{ж}} \cdot \frac{u^2}{gd}. \quad (4)$$

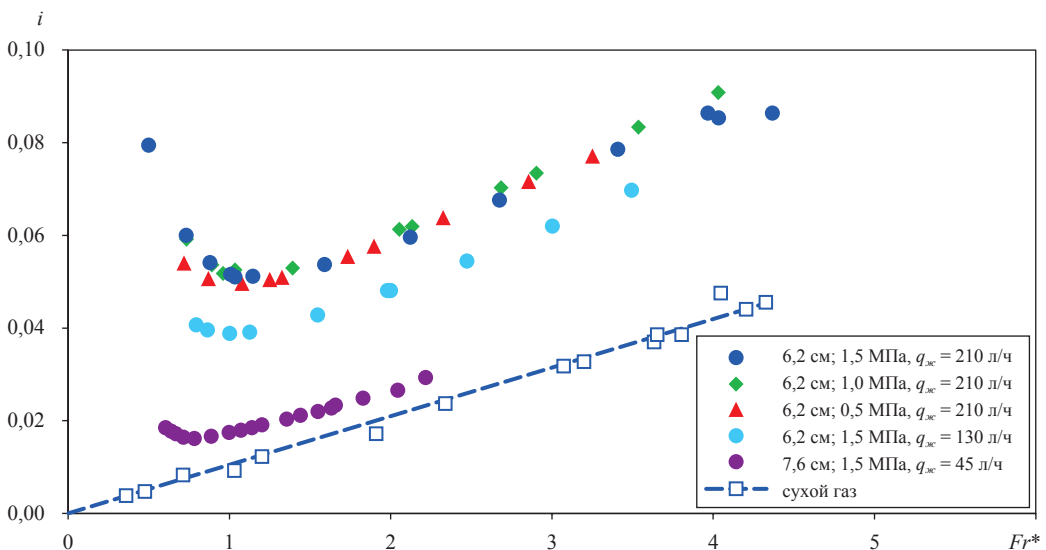
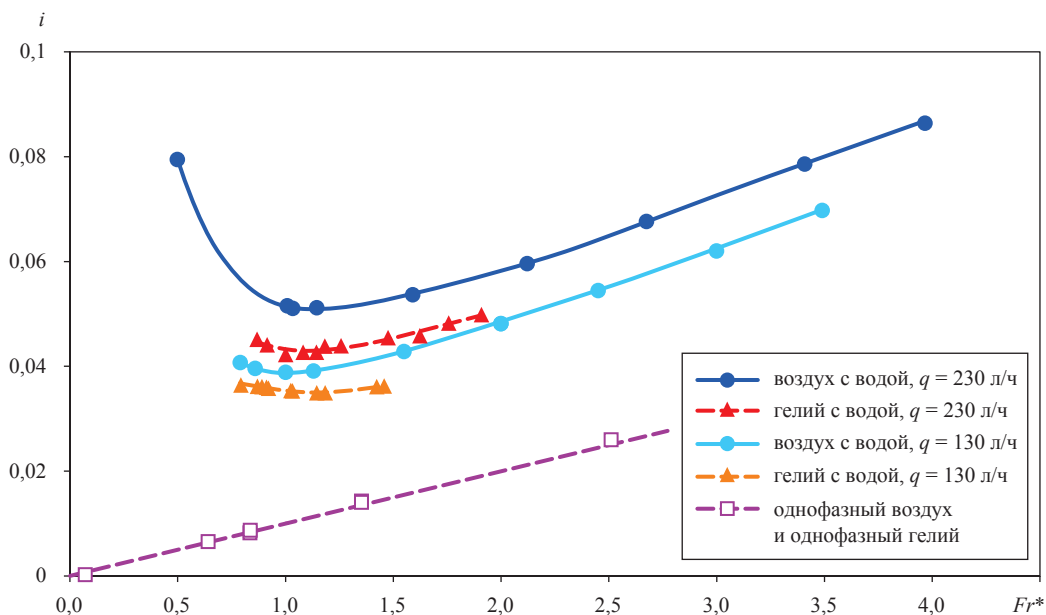


Рис. 4. Экспериментальные данные для труб диаметром 6,2 и 7,6 см в координатах « $i - Fr^*$ »

Результаты экспериментов с гелием представлены на рис. 5, согласно которому, во-первых, положения минимумов характеристик лифта по оси абсцисс для водовоздушной и водогелиевой смесей в выбранных координатах совпадают, и, во-вторых, зависимости для однофазных гелия и воздуха сливаются.

Эти факты, по мнению авторов, являются достаточным обоснованием структуры модифицированного параметра Фруда в виде (4). Кроме того, как видно из приведенных экспериментальных графиков, величина параметра Fr^* при минимальных потерях давления приблизительно равна единице, т.е. на этом участке сила, создаваемая напором газа, уравновешивается силой веса жидкости, что соответствует физическим представлениям о рассматриваемых процессах и общему смыслу безразмерных критериев подобия. Поэтому модифицированный параметр Фруда можно рассматривать не только как число подобия, но и как безразмерный критерий. Таким образом, физический смысл модифицированного параметра Фруда в форме (4) заключается в том, что он отражает конфликт сил, создаваемых напором газа, и сил гравитационной природы, действующих на жидкость. Этот параметр рекомендуется использовать для описания процессов подъема жидкости газом в условиях низких водосодержаний, т.е. в тех случаях, когда газовая фаза является непрерывной. Из рис. 5 также следует, что изменение плотности газа в 7 раз (почти на порядок) приводит к изменению перепада дав-



**Рис. 5. Структура модифицированного параметра Фруда в виде (4).
Результаты экспериментов с газожидкостными смесями «вода – воздух» и «вода – гелий»
при расходах воды 130 и 230 л/ч**

ления не более чем на 10 %. Это весьма существенный экспериментальный факт, поскольку он позволяет использовать полученные экспериментальные результаты для прогнозирования водометановых смесей, так как плотность метана всего в 1,8 раза меньше плотности воздуха, и подтверждает правомерность использования безразмерного параметра i для описания рассматриваемых процессов.

Перейдем к изучению третьего безразмерного параметра, существенного для описания поведения вертикальных газожидкостных потоков. Рассмотрим правую часть характеристических кривых лифта. Как показывает анализ экспериментальных данных, правые ветви характеристик лифта для разных расходов жидкости и труб разного диаметра в координатах « $i = i(Fr^*)$ » являются прямыми линиями, параллельными прямой зависимостям для однофазного газа, которые описываются формулой Дарси–Вейсбаха. Промежуток между характеристикой лифта и прямой Дарси–Вейсбаха при фиксированном значении модифицированного параметра Фруда определяется диаметром трубы и величиной расхода жидкости; эта величина не зависит от расхода газа (по крайней мере, в диапазоне параметра Fr^* от точки минимума на кривой лифта до 3) и названа «дополнительными потерями». Таким образом, суммар-

ные потери давления в газожидкостном потоке определяются двумя составляющими:

$$i = i_0 + \Delta i, \tag{5}$$

где i_0 – потери давления для однофазного газа, определяемые в соответствии с формулой Дарси–Вейсбаха:

$$i_0 = \frac{\lambda}{2} Fr^*; \tag{6}$$

Δi – дополнительные потери давления за счет наличия жидкости в потоке. В формуле (6) λ – коэффициент гидравлического сопротивления трубы для однофазного газа.

По мнению авторов, природа дополнительных потерь заключается в том, что в условиях дисперсно-кольцевого режима (а именно этот режим реализуется на правой ветви характеристики лифта) по всей длине трубы происходит интенсивный обмен жидкостью между газовым ядром (в котором жидкость существует в виде капель, обладающих высокой скоростью, приближающейся к скорости газового ядра) и пленкой жидкости на стенке трубы (малоподвижной по сравнению с газовым ядром) [5, 6].

Эксперименты на трубах разного диаметра при различных значениях расхода жидкости

позволили установить, что зависимость дополнительных потерь от этих параметров для водовоздушных смесей определяется формулой

$$\Delta i = k_1 \left(\frac{q_{жс}}{d^4} \right)^{2/3}, \quad (7)$$

где k_1 – эмпирический размерный коэффициент.

Перепишем (7) в виде

$$\Delta i = kBu, \quad (8)$$

где k – безразмерный эмпирический коэффициент; Bu – безразмерный параметр, который, как следует из (5) и (8), характеризует дополнительные потери давления в газожидкостном потоке за счет наличия жидкой фазы [5].

Этот параметр играет существенную роль на правой ветви характеристики лифта, т.е. в устойчивом режиме течения смеси. Как следует из экспериментальных результатов, дополнительные потери в этой области зависят не от расхода газовой фазы, а только от расхода жидкости и диаметра трубы, и, таким образом, однозначно определяются параметром Bu . Этот параметр назван параметром С.Н. Бузинова, поскольку идеи именно этого выдающегося ученого лежат в основе экспериментальных и теоретических исследований двухфазной трубной гидродинамики, осуществляемых в ООО «Газпром ВНИИГАЗ» в последние годы. Сравнивая (7) и (8), параметр Bu можно представить в виде

$$Bu = \ell \frac{Fr_{жс}^{1/3}}{d}, \quad (9)$$

где $Fr_{жс}$ – число Фруда по жидкости, определяемое выражением

$$Fr_{жс} = \frac{w^2}{gd}, \quad (10)$$

w – средняя по сечению потока скорость жидкой фазы; ℓ – коэффициент с линейной размерностью. Для определения его структуры воспользуемся теорией размерностей.

Поскольку в ряде публикаций делается утверждение о незначительном влиянии вязкости жидкости на процесс каплеобразования в потоке газа (по крайней мере, при ее значении $\mu < 2$ сПз) [7], будем пренебрегать влиянием вязкости и рассматривать возможную зависимость коэффициента ℓ от таких параметров процесса, как поверхностное натяжение на гра-

нице «газ – жидкость» и плотность жидкости. С учетом принятых допущений с помощью теории размерностей можно получить

$$\ell = \left(\frac{\sigma}{\rho_{жс} g} \right)^{1/2}. \quad (11)$$

Для системы «газ – вода» имеем $\ell = 2,67 \cdot 10^{-3}$ м. Тогда из (9)–(11) следует:

$$Bu = \left(\frac{\sigma}{\rho_{жс} g d^2} \right)^{1/2} \cdot \left(\frac{w^2}{gd} \right)^{1/3}. \quad (12)$$

Поскольку первый безразмерный комплекс, входящий в состав (12), известен как критерий Этвёша

$$Eö = \frac{\rho_{жс} g d^2}{\sigma}, \quad (13)$$

который характеризует соотношение сил веса и поверхностного натяжения на границе раздела жидкой и газовой фаз, выражение (12) можно записать в виде

$$Bu = \frac{Fr_{жс}^{1/3}}{Eö^{1/2}}. \quad (14)$$

На рис. 6 представлена экспериментальная зависимость (8) потерь давления от параметра Bu при $Fr^* = 1,5$ для труб разного диаметра в диапазонах расходов жидкости от 2 до 500 л/ч и давлений от 0,3 до 3,0 МПа. Из полученных экспериментальных результатов следует, что $k = 9,60$.

Отметим, что выражение (7) отражает экспериментальные факты, в то время как структура параметра (14) получена на основе методов теории размерностей, поэтому ее необходимо проверить дополнительными экспериментами. Однако для смесей «вода – природный газ» формулы (7), (9) и (14) идентичны и могут быть рекомендованы к применению в расчетах потерь давления в лифтовых колоннах на поздней стадии разработки газовых месторождений.

С учетом изложенного потери давления в устойчивом вертикальном газожидкостном потоке (5) можно представить в виде суммы двух независимых слагаемых, одно из которых (6) определяется расходом газа и не зависит от расхода жидкости, а другое (8) определяется расходом жидкости и не зависит от расхода газа:

$$i = \frac{\lambda}{2} Fr^* + kBu. \quad (15)$$

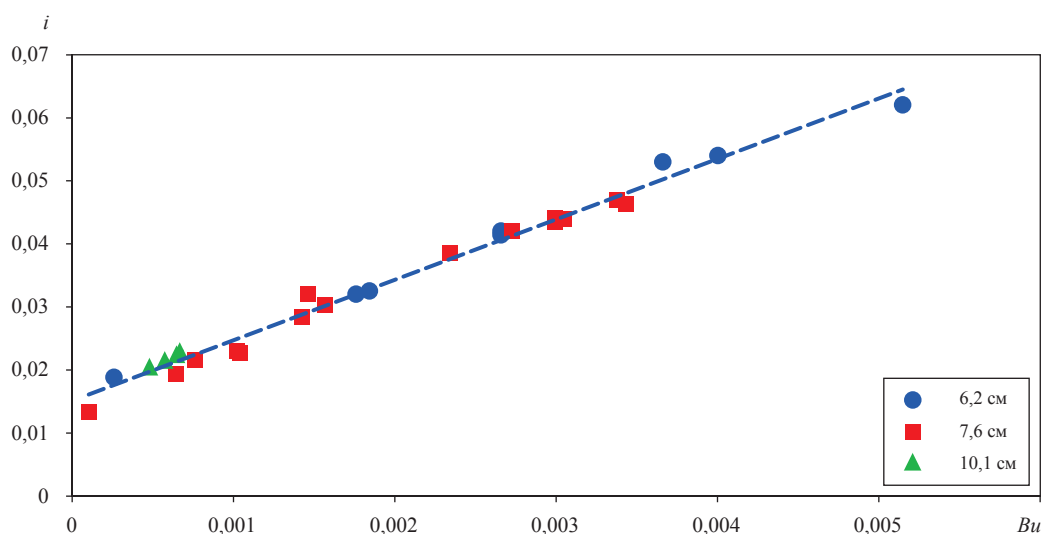


Рис. 6. Зависимость потерь давления от параметра Vi для труб разного диаметра

Известно, что некоторое (незначительное) количество жидкости в газовом потоке может несколько снижать потери давления за счет смачивания стенок трубы и уменьшения ее шероховатости. В рассмотренных экспериментах это явление было также зафиксировано; однако поскольку диапазон расходов жидкости, сопровождающих его, весьма мал, а величина снижения потерь давления составляет не более нескольких процентов, для целей данной работы оно не существенно и поэтому не освещается.

Отметим также, что представленные в работе закономерности имеют отношение к правой ветви характеристики лифта, т.е. соответствуют случаю устойчиво работающей газовой скважины с водопрооявлениями. Для построения модели двухфазного потока на левой ветви в ООО «Газпром ВНИИГАЗ» проводятся дополнительные экспериментальные и теоретические работы.

Таким образом, экспериментально обосновано следующее:

1) вертикальные газожидкостные потоки, имеющие место в обводняющихся газовых скважинах, описываются такими безразмерными параметрами, или числами подобия, как модифицированный параметр Фруда (4), параметр С.Н. Бузинова (9) и безразмерные потери давления (2);

2) в устойчиво работающей газовой скважине с водопрооявлениями потери давления слагаются двумя независимыми составляющими, одна из которых определяется потоком газа, а другая – потоком жидкости (15).

Список литературы

1. Брилл Дж.П. Многофазный поток в скважинах / Дж.П. Брилл, Х. Мукерджи. – М.; Ижевск: Ин-т комп. иссл., 2006. – 384 с.
2. Изюмченко Д.В. Газожидкостные потоки в вертикальных трубах: парадоксы гидродинамики / Д.В. Изюмченко, О.В. Николаев, С.А. Шулепин // Вести газовой науки: Проблемы эксплуатации газовых, газоконденсатных и нефтегазоконденсатных месторождений. – М.: Газпром ВНИИГАЗ, 2013. – С. 36–45.
3. Тер-Саркисов Р.М. Новый этап в изучении газожидкостных потоков в вертикальных трубах / Р.М. Тер-Саркисов, Р.С. Сулейманов, С.Н. Бузинов и др. // Газовая промышленность. – 2006. – № 3. – С. 64–67.
4. Ахмедов Б.Г. Эксплуатация газовых скважин на поздней стадии разработки / Б.Г. Ахмедов, С.Н. Бузинов // Разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений. – М.: ВНИИЭгазпром, 1980. – Вып. 10. – 37 с.
5. Николаев О.В. Регулирование работы газовых скважин на завершающей стадии разработки залежей по результатам экспериментальных исследований газожидкостных потоков в вертикальных трубах: дис. канд. техн. наук / Николаев Олег Валерьевич. – М., 2012. – 128 с.
6. Azzopardi B.J. Drops in Annular Two-Phase Flow / B.J. Azzopardi. – Int. J. Multiphase Flow, 1997. – Vol. 23. – P. 1–53.
7. Витман Л.А. Распыливание жидкости форсунками / Л.А. Витман, Б.Д. Кацнельсон, И.И. Палеев. – М.: Госэнергоиздат, 1962. – 265 с.